



Im Zauberland der Physik

Physikalische Spielzeuge machen Kindern und Erwachsenen Spaß. Ganz nebenbei lassen sich an ihnen Grundprinzipien der Physik erklären. Von Christian Ucke

Der Ausschnitt aus dem Gemälde »Kinderspiele« des niederländischen Malers Pieter Brueghel d. Ältere (1525/30 – 1569) zeigt Kinder beim Spiel mit der Nussmühle und mit Seifenblasen. Auf dem Gesamtgemälde hat der Maler 80 unterschiedliche Spiele und Spielzeuge dargestellt.

Physiker spielen gerne. Liebevoll bezeichnen sie ihre Forschungsgeräte als Spielzeug. Selbst größte Apparaturen wie der Teilchenbeschleuniger in Genf oder der Forschungsreaktor in Garching bei München werden manchmal salopp so charakterisiert. Der Begriff »Physikalische Spielzeuge« beinhaltet demgegenüber eher kleinere handliche Einzelobjekte wie Kreisel oder Kaleidoskope. Die dienen überwiegend nicht der ernsthaften Forschung, sondern eher einer spielerischen Erfahrung mit möglichem Lerneffekt.

In Deutschland wurden physikalische Spielzeuge schon vor über hundert Jahren für den Einsatz im Physikunterricht der Schulen vorgeschlagen. Lehrer bewegen sich hier auf einem schmalen Grat. Ähnliche Überlegungen gelten für Science Center, in denen ein spielerischer Umgang mit physikalischen Phänomenen einen respektablen Anteil ausmacht. Mittlerweile gibt es im angloamerikanischen Bereich sehr viele Publikationen zur Thematik. In den USA wurden von der National Science Foundation Initiativen gefördert, die über das Vehikel Spielzeug im Unterricht das Interesse für Naturwissenschaften erhöhen sollten. Auch in Deutschland ist das zu beobachten. Die Ergebnisse sind eher bescheiden. Ein Spielzeug motiviert in dieser Hinsicht nicht von alleine, eine kompetente Bezugsperson ist noch wichtiger.

Die meisten physikalischen Spielzeuge sind im Bereich der Mechanik zu finden. Viele dieser Spielzeuge kann man mit einfachsten Mitteln selbst bauen – und das schon seit Jahrtausenden. Legendar ist die Darstellung von achtzig Kinderspielen und -spielzeugen aus dem Mittelalter auf einem Bild von Pieter Brueghel, darunter überwiegend mechanische Spielzeuge. Aber auch in neuester Zeit kommen bemerkenswerte Kreationen dazu, sei es der Sportkreisel Dynabee



1) Bild links: Scheinbar gegen alle Regeln der Physik rollt der Doppelkegel aufwärts.

2) Bild rechts: Auf die Geschicklichkeit kommt es beim Kugelspiel an: Durch vorsichtiges Öffnen der Stäbe rollt die Kugel nach oben. Wird der Spalt zu groß, dann fällt die Kugel in eine der Aussparungen.



(Power-Ball) oder die paradoxe Sanduhr, bei der der Sand entgegen der Schwerkraft von unten nach oben rieselt.

Weitaus weniger physikalische Spielzeuge sind hingegen aus der Thermodynamik oder Elektrodynamik hervorgegangen. Bekannt ist das Galileo-Thermometer. Auch das nur in Deutschland so genannte Goethe-Thermometer (Englisch: weather glass) zählt dazu, die weit verbreitete trinkende Ente ist berühmt. Zu den eher technischen Spielzeugen werden Dampfmaschinen oder Stirlingmotoren gerechnet.

Interessante physikalische Spielereien sind auch mit Seltenmagneten möglich. Dazu gehört der frei in der Luft schwebende Levitron-Kreisel ebenso wie die sogenannte magnetische Kanone. Ein weiteres Beispiel aus dem elektromagnetischen Bereich ist ein handlicher Van-de-Graaff-Generator, der eine Spannung von einigen tausend Volt erzeugt und elektrostatische Schweben-Experimente mit kleinen Objekten erlaubt. Aus der Optik sind schon lange viele physikalische Spielobjekte bekannt. Kaleidoskope sind weit verbreitet. Mit Spiegeln lassen sich überraschende Effekte erzielen, seien es anamorphotisch verzerrte Bilder, Unendlichkeitsspiegel oder Spiegel-Irrgärten.

1) Der aufwärtsrollende Doppelkegel

Der aufwärtsrollende Doppelkegel ist ein schönes Beispiel für ein physikalisches Spielzeug, das auch als Lehrmittel eingesetzt wird und zusätzlich einen wichtigen Vorgang in der Eisenbahntechnik demonstrieren kann.

Bereits 1694 beschreibt William Leybourn in seinem unterhaltsamen Buch *Pleasure with Profit: Consisting of Recreations of Diverse Kinds* dieses Experiment als mechanisches Paradoxon. Es ist in der Tat irritierend, einen Gegenstand auf schräg ansteigenden Leisten von selbst nach oben, also entgegen der Schwerkraft, rollen zu sehen. Schon nach kurzer Zeit kommen jedoch die meisten Beobachter hinter den Trick: Zwar verlaufen die Leisten ansteigend, der Schwerpunkt des Kegels bewegt sich jedoch nach unten. Im Einzelnen hängt das von dem Winkel zwischen den Leisten, dem Anstiegswinkel der Leisten und dem Kegelwinkel ab. Dieses Experiment lässt sich leicht selbst aus Bastelmaterialien (Kunststoff, Holz, Papier) bauen. Im Unterricht lassen sich damit physikalische Begriffe wie potenzielle und kinetische Energie oder Energieerhaltung verdeutlichen.

Setzt man den Doppelkegel etwas schief auf, d. h. nicht rechtwinklig bezüglich der Mittelachse der Schienen, rollt er ebenfalls nach oben. Dabei vollführt er eine wackelnde, schlangenähnliche Bewegung, die dann allerdings in der Amplitude abnimmt, d. h. der Kegel zentriert sich auf die Mittelachse. Die Räder von Eisenbahnen sind bei der Auflage auf den Schienen konisch profiliert. Man kann sie als einen Ausschnitt aus einem Doppelkegel ansehen. Ähnlich wie beim Doppelkegel hat diese technische Ausformung der Räder eine Zentrierung der Waggons zur Mitte der Schienen zur Folge. Ohne diesen Effekt wäre der Verschleiß der Räder extrem groß. Der aufwärtsrollende Doppelkegel reizt sogar gestandene Physiker, ihre im Studium erlernten mathematischen und physikalischen Fertigkeiten darauf anzuwenden. Es gibt immer wieder Veröffentlichungen dazu in angesehenen Physikzeitschriften. Auch wenn diese Arbeiten nicht unmittelbar forschungsrelevant sind, tragen sie doch zu einem vertieften Verständnis der dynamischen Vorgänge bei.

2) Das Kugelspiel

Bei dem sogenannten Kugelspiel sind zwei Metallstangen ansteigend und im Winkel zueinander veränderlich angeordnet. Eine schwere Metallkugel liegt am unteren Ende zwischen den Stangen. Vergrößert man den Winkel zwischen den Stangen, rollt die Kugel aufwärts – und fällt dann zwischen den Stangen hindurch. Die Kugel verhält sich in diesem Spiel wie der sich im Kegelwinkel verändernde Doppelkegel. Verkleinert man nach dem Anrollen der Kugel den Winkel zwischen den Stangen, kann man erreichen, dass die Kugel bis zum Anschlag aufwärtsrollt. Die Physik tritt bei diesem faszinierenden Spielzeug in den Hintergrund. Ich habe bei Jugendlichen dennoch immer wieder Diskussionen über die optimale Strategie miterlebt. Dabei ging es um die Frage, ob es günstiger ist, die Kugel am Anfang schnell losrollen zu lassen (große kinetische Anfangsenergie) und den Stangenwinkel in der Folge relativ schnell zu verkleinern oder die Kugel langsam losrollen zu lassen und den Stangenwinkel dann langsamer zu verkleinern.

3) Bunte Springtiere

Springspielzeuge hat Brueghel in seinem Bild »Kinderspiele« zwar nicht dargestellt, sie zählen aber auch zu den eher ein-



3) Springtiere können nicht nur hüpfen. Einige schlagen sogar Purzelbäume.

fachen Konstruktionen. Sie beinhalten eine Feder, die in zusammengedrücktem oder gestrecktem Zustand Energie gespeichert hat. Damit können Spielobjekte hochspringen, einen Salto drehen oder Gegenstände weggeschleudert werden. Bei einigen Objekten wird der obere Kunststoffteil mit dem Saugnapf nach unten gedrückt, bis der Saugnapf auf dem Boden die flexibel-biegsamen Stahldrähte hält. Nach einer schwer vorhersagbaren Zeit springt das Spielzeug bis zu einem Meter hoch. Die Schildkröte (im Bild oben Mitte) funktioniert in gleicher Weise und springt sogar noch etwas höher. Das rote Känguru (im Bild vorne rechts) enthält einen ingeniosen Federmechanismus, der es hintereinander mehrere Saltos rückwärts vollführen lässt.

Beispielhaft sei eine kleine Rechnung für die Schildkröte durchgeführt. Es ist eine sogenannte Überschlagsrechnung mit vereinfachten Annahmen, die immerhin eine Abschätzung von Größenordnungen ermöglicht. Drückt man die Feder des Spielzeugs auf einer einfachen Küchenwaage nach unten, bis der Saugnapf gerade die Basis berührt, ergibt sich ein Wert von etwa 2 Kilogramm, gleichbedeutend mit einer Kraft von $F=20$ Newton (N). Die Masse (m) des gesamten Spielzeugs lässt sich auf einer Briefwaage zu etwa $m=13$ g ermitteln, die des oberen Teils mit dem Saugnapf zu 7 g. Mit dem Newton'schen Grundgesetz $F = m \cdot a$ ergibt sich eine Startbeschleunigung (a) des oberen Teils (mit Saugnapf) von $a = 20\text{ N}/0,007\text{ kg} \approx 2800\text{ m/s}^2 = 280\text{ g}$ ($g = 10\text{ m/s}^2 = \text{Erdbeschleunigung}$). Das ist ein enorm großer Wert. Der Mensch schafft beim Hochsprung aus dem Stand gerade mal 3 g. Trainierte Jetpiloten und Astronauten müssen kurzfristig bis zu 10 g aushalten. Ein Floh schafft immerhin beim Hochspringen bis zu 300 g, was seinem Gehirn offenbar nicht schadet.

Der eigentliche Absprungvorgang der springenden Spielzeuge läuft in etwa 13 Millisekunden ab, für das menschliche Auge nicht auflösbar. Man bemerkt auch nicht, dass das Oberteil gegen die Basis beim Hochspringen mit einer Frequenz von etwa 80 Hertz schwingt.

4) Die trinkende Ente

Unter dem Namen »Drinking Bird« wurde dieses Spielzeug im Jahre 1945 von Miles V. Sullivan patentiert und seitdem millionenfach produziert. Es gibt Hinweise auf Vorgängerkonstruktionen im 19. Jahrhundert. Das sogenannte Liebes-

4) Ohne Anstoß bewegt die trinkende Ente ihren Kopf wippend hin und her. Das ist keine Zauberei sondern Thermodynamik.



thermometer (lovemeter) beruht auf den gleichen physikalischen Prinzipien.

Die Ente wird vor ein gut gefülltes Glas Wasser gestellt. Alkohol geht übrigens auch – mit gewissen Folgen! Der mit einem Filz bedeckte Kopf wird befeuchtet, dann kann man die Ente sich selbst überlassen. Die Flüssigkeit steigt langsam aus dem unteren Vorratsbehälter auf und verändert damit den Schwerpunkt so, dass die Ente nach vorne kippt und von dem Wasser nippt. In diesem Moment läuft die Flüssigkeit im Inneren in dem Glasröhrchen in den unteren Teil der Ente zurück, der Schwerpunkt verlagert sich und die Ente richtet sich wieder auf.

Warum steigt die Flüssigkeit im Glasröhrchen nach oben? Das Wasser im Filz des Kopfes verdunstet und kühlt den Kopf ab – mit Alkohol übrigens schneller. Die Temperatur im Inneren des hohlen Kopfes verringert sich und der Druck nimmt ab. Dabei ist wesentlich, dass die im Inneren der Ente befindliche Flüssigkeit im Gleichgewicht nur mit ihrem eigenen Dampfdruck steht – da ist keine Luft drin. Diese Flüssigkeit sollte eine möglichst starke Veränderung des Dampfdrucks mit der Temperatur im Bereich von üblichen Zimmertemperaturen aufweisen. Dazu wurden früher relativ unangenehme Flüssigkeiten benutzt (Methylenchlorid, Diethylether), die mittlerweile für diesen Zweck verboten sind. Neuere Versionen der Trinkente sind mit ungefährlichen, allerdings geheim gehaltenen Mischungen versehen.

5) Minutenlang schwebt der Kreisel in der Luft. Gehalten wird er von unsichtbaren Magnetkräften.



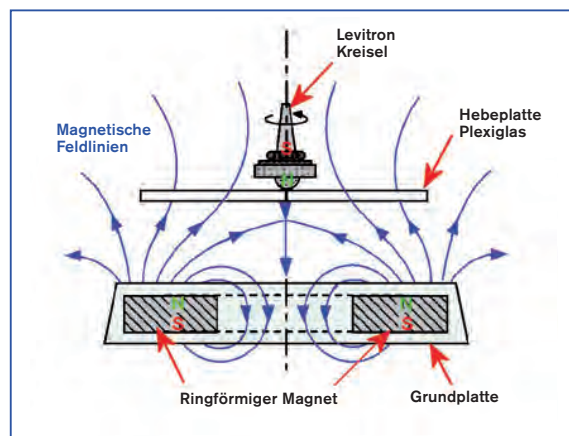
Der verringerte Druck im Kopf zieht dann die Flüssigkeit in dem Glasröhrchen hoch. Die Ente beginnt sich zu neigen. Dadurch verändert sich der Schwerpunkt wie oben beschrieben. Der Schnabel der Ente taucht in das Wasser ein. Im gleichen Moment taucht das untere Ende des Glasröhrchens aus der Flüssigkeit hoch. Der hier gegenüber dem Kopf höhere Druck drückt eine (Dampf-)Blase durch das Röhrchen nach oben, erzeugt dadurch einen Druckausgleich und die Flüssigkeit kann zurück nach unten fließen, wobei die Ente zurückschwingt. Der Rand des Glases darf nicht zu tief liegen, da sonst die Ente in einer waagerechten Position oder noch weiter geneigt liegen bleiben kann.

Eigentlich sieht die trinkende Ente nach einer wunderbaren Möglichkeit aus, auf ökologische Weise Energie zu erzeugen. Es wird ja nur etwas Wasser verbraucht, die Flüssigkeit im Inneren bleibt eingeschlossen. Leider steht dem ein beklagenswert geringer und damit völlig unwirtschaftlicher Wirkungsgrad in der Größenordnung von weniger als einem Prozent entgegen. Der Temperaturunterschied zwischen Kopf und unterem Teil der Ente beträgt nur wenige Grad. Mit einer Kopftemperatur von $t_k = 17^\circ\text{C}$ ($T_k = 290\text{ K}$; absolute Temperatur in Kelvin) und $t_u = 20^\circ\text{C}$ ($T_u = 293\text{ K}$) im unteren Teil ergibt sich der thermodynamische Wirkungsgrad zu $\eta = 1 - T_k/T_u = 1 - 290/293 \approx 0,01 = 1\%$. Der technische Wirkungsgrad ist noch geringer, da ja Maschinen zur Energieerzeugung mit entsprechenden Verlusten angekoppelt werden müssten.

5) Levitron – ein magnetischer Schwebekreisel

Der magnetische Schwebekreisel Levitron ist eines der eher seltenen Spielzeuge aus dem Bereich des Elektromagnetismus. Er scheint die Verwirklichung eines Menschheitstraumes zu demonstrieren: das freie Schweben gegen die Gravitation. Jahrhundertelang tüftelten Laien und Wissenschaftler an einem solchen Aufbau, unbeeindruckt von einem Theorem des Engländers Earnshaw von 1842, das die Realisierung dieses Traumes mit üblichen Permanentmagneten als nicht machbar bewies.

Der Amerikaner Roy Harrigan patentierte eine Vorrichtung mit der Bezeichnung »Levitation Device«. Sie besteht aus einem Kreisel mit einem Magneten. Unter ihm befindet sich ein ringförmiger Magnet mit entgegengesetzter Polung, in der



Die Grafik links verdeutlicht die Funktionsweise des Levitrons.

Abbildung oben ist dieser versteckt in der Holzplattform. Der Trick besteht darin, den Kreisel auf einer Plexiglasplatte über dem ringförmigen Magneten anzudrehen und dann langsam mit der Platte hochzuheben. In einer kritischen Höhe gewinnen die magnetisch abstoßenden Kräfte eine Größe, die den rotierenden Kreisel schweben lässt. Dazu muss das Gewicht des Kreisels mit den auf dem Tisch liegenden Lochscheiben auf Milligramm genau austariert sein. Die Plexiglasplatte wird weggezogen. Die Feldlinien des ringförmigen Magneten verhindern in der optimalen Höhe ein Absinken und Weggleiten des Kreisels zur Seite. Die Rotation des Kreisels ist unabdingbar für das Schweben, vergleichbar wichtig, wie bei einem hinreichend schnell rotierenden Kreisel auf einem normalen Boden das Umfallen verhindert wird. Wenn die Drehzahl des Kreisels nach einigen Minuten unter eine gewisse Grenze sinkt, neigt sich der Kreisel zur Seite und fällt auf die Grundplatte zurück. Es sei angemerkt, dass es einer nicht unerheblichen Übung und Geschicklichkeit bedarf, um den Kreisel zum Schweben zu bringen.

Was hier in wenigen Sätzen beschrieben ist, hat bei genauerer Analyse sehr tiefgreifende, physikalische Hintergründe, die in entsprechenden Publikationen beschrieben sind. Der Levitron-Kreisel ist mittlerweile in mehreren Variationen erhältlich. Mit einigem Aufwand lässt er sich auch aus Einzelteilen selbst bauen.

Ungewöhnlich ist die Entstehungsgeschichte des Levitron-Kreisels. 1983 ließ Harrigan seine Vorrichtung patentieren. 1993 zeigte er seine Erfindung dem Spielzeughersteller Bill Hones, der sie schließlich – etwas abgewandelt – von seiner



6) Ähnlich wie diese Zeilenlupe, nur sehr viel kleiner, werden 3D-Postkarten aus solchen Zylinderlinsen zusammengesetzt. Außerdem im Bild ein Vollzylinder aus Plexiglas – auch mit Linsenwirkung.

Firma »fascinations toys« produzieren ließ und erfolgreich vermarktete, obgleich Harrigan weder damit einverstanden war noch davon profitierte. Ein Beispiel dafür, dass selbst eine einmalig interessante und auch noch namentlich patentierte Erfindung keineswegs wirtschaftlichen Erfolg für den Erfinder selbst bedeutet.

6) 3D-Bilder mit Zylinderlinsen

Wie kann man 3D-fernsehen ohne besondere Brille? Das ist zurzeit Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung. Eine Vorstufe ist die 3D-Postkarte, die vermutlich den meisten Lesern aus Science Shops oder Touristenläden bekannt ist. Sie wird auch als Linsenrasterkarte (Englisch: lenticular card) bezeichnet, was schon auf die Konstruktion hindeutet.

Damit wir etwas dreidimensional sehen können, benötigt unser Gehirn zwei Ansichten desselben Objektes aus unterschiedlicher Perspektive. Das wird normalerweise von unseren relativ nah beieinander liegenden Augen bewerkstelligt. Man kann z. B. zwei Fotos desselben Objektes aus unterschiedlicher Perspektive nebeneinander halten und sie durch starke Akkommodation oder mit Hilfe von Linsen und/oder Prismen etwas bequemer zu einem 3D-Eindruck miteinander verschmelzen. Diese Technik war im 19. Jahrhundert weit verbreitet. Bequemer ist es, wenn man eine aus nur einem Blatt bestehende Konstruktion in der Hand hält und keine Brille oder Zusatzeinrichtungen benötigt. Die Grundlagen zu den sogenannten Linsenrasterkarten wurden schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts gelegt. Die Entwicklung der Drucktechnik und der Optik führte um 1940 zu den 3D-Postkarten, die dann etwa 1950 populär wurden.

Im einfachsten Fall werden zwei Bilder desselben Objekts in schmale Streifen zerschnitten. Die Streifenbreite reicht heute bis auf Zehntelmillimeter und noch darunter. Dafür ist eine extreme Genauigkeit und Qualität der Drucktechnik erforderlich. Darüber wird ein Raster von Zylinderlinsen gelegt, das hinsichtlich der optischen Abbildung gerade so optimiert ist, dass die Streifenbilder scharf gesehen werden können. Die Zylinderlinsen sind ebenfalls ungefähr so breit wie die Streifenbilder. Der Trick besteht darin, diese Streifenbilder so unter den Zylinderlinsen anzuordnen, dass beispielsweise beim Blick mit dem rechten Auge nur die Streifen als vollständiges Bild gesehen werden, die zu dem Bild gehö-

ren, das vom rechten Auge wahrgenommen werden soll. Dasselbe gilt umgekehrt für das linke Auge.

Statt der Streifenbilder kann man sich auch die Pixel eines Fernsehers in senkrechten Spalten angeordnet vorstellen. Befindet sich darüber ein Zylinderlinsenraster und stellen die Pixelspalten jeweils ein Teilbild dar, ergibt sich eine Anordnung wie bei der 3D-Postkarte. Derartige 3D-Fernseher und -Notebooks gibt es schon, wenn auch noch nicht mit wirklich befriedigender Qualität. Einige der Probleme, die sich dabei ergeben, können hier nur kurz angedeutet werden. Die Optik der Linsen ist im Prinzip auf einen festen Abstand berechnet. Die Zuschauer sitzen aber nicht immer in gleichem Abstand davor. Es sitzt auch häufig nicht nur ein Zuschauer senkrecht vor dem Fernseher, sondern mehrere in schiefen Winkeln zum Bildschirm. Die Pixelanzahl heutiger HD-Fernseher muss daher in der Waagerechten mindestens verdoppelt, besser sogar vervierfacht werden. Das Heinrich-Hertz-Institut in Berlin ist maßgeblich an der Entwicklung solcher Bildschirme beteiligt.

Mit Linsenrastern werden auch »Wechselbilder« erstellt, bei denen zwei oder mehr Bilder in einer Postkarte enthalten sind, die beim Kippen der Karten sichtbar werden. Diese Technik ist heute so weit entwickelt, dass schon eine Art Minivideo mit bis zu dreißig Bildern realisiert werden kann. 3D-Linsenraster-Bilder und -Wechselbilder kann man heute mit üblichen Rechnern und Druckern sowie eigenen Fotos selbst herstellen. Nur das entsprechende Programm und die Linsenraster muss man erwerben. ■



DER AUTOR

Dr. Christian Ucke

war als Physiker an der Technischen Universität München tätig und beschäftigt sich mit der Physik von Spielzeugen.



Zum Weiterlesen

Christian Ucke, H. Joachim Schlichting, *Spiel, Physik und Spaß. Physik zum Mitdenken und Nachmachen*, Berlin 2011.

Aus redaktionellen Gründen konnte die folgende Liste nicht in der gedruckten Fassung wiedergegeben werden

Literatur, web-links und Bezugsquellen:

Einleitung

Dussler, G.: Spiel und Spielzeug im Physikunterricht, Verlag Otto Salle, Frankfurt a.M. 1933
www.webec.de/cms/front_content.php?idart=334 *Erläuterungen zum Brueghel-Bild ‚Kinderspiele‘*

Mechanik (aufwärtsrollender Doppelkegel, Kugelspiel und Springtiere)

Leybourn, W.: Pleasure with Profit, London 1694 *erster Hinweis auf den Doppelkegel*
<http://daskugelspiel.de/> *Hersteller und Bezugsquelle*

Gandhi, S., Efthimiou, C.: The ascending double cone: a closer look at a familiar demonstration,
Eur. J. Phys. 26 (2005) 681.

Cortés, E., Cortés-Poza, D.: Mechanical paradox: the uphill roller, Eur. J. Phys. 32 (2011) 1559.
www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/jump3a.avi *Hochgeschwindigkeitsvideo (2000 Bildern pro Sekunde) zum Springtier*

Thermodynamik (trinkende Ente)

Miles V. Sullivan designed the Drinking Bird: U.S. Patent 2,402,463 on Aug 6, 1945

Elektromagnetismus (Levitron – der schwebende Kreisel)

www.fascinations.com/unique-toys-gifts/levitron-ultimate *Hersteller*

Earnshaw, S.: On the Nature of the Molecular Forces which regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 7, 1842

<https://de.wikipedia.org/wiki/Earnshaw-Theorem> *etwas verständlichere Darstellung*

U.S. Patent 4,382,245 on May 3, 1983 *erstes Patent zum schwebenden Magnetkreisel*

Berry, M.: ‘The Levitron™: An adiabatic trap for spins’, Proc. R. Soc. Lond. A (1996) 452. 1207

www.myquilt.de/al/physalt/levitron/levitron.htm *Nachbau eines Levitron-Kreisels von Schülern*

www.roddriver.com/index_science.html *Geschichte des Levitron-Kreisels*

Optik (3D-Postkarten)

http://en.wikipedia.org/wiki/Lenticular_printing *zur Geschichte der Linsenraster-Bilder*

www.hhi.fraunhofer.de/ *Webseite des Heinrich-Hertz-Instituts*

www.touchmore.de/supermotion-lenticular *Hersteller hochauflöster Wechselbilder*

www.3d-easy.de *Vertrieb von Software für Herstellung eigener Linsenraster-Bilder*